

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01849

研究課題名（和文）磁性体との相互作用を用いた単原子層ラシュバ型超伝導体に対する研究

研究課題名（英文）Monolayer Rashba superconductors studied through interaction with magnetic materials

研究代表者

岡本 徹 (Okamoto, Tohru)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：60245371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：表面磁性原子によるPb超薄膜の超伝導転移温度 T_c の減少率を磁性体やコーティング物質を系統的に変えて調べた。実験結果は、以下の(1)(2)(3)を仮定することによりすべて説明することができた。(1)は近藤温度TKが T_c と同程度のところで最大となる。(2)TKは磁性原子のスピンの増加に伴い急激に減少する。(3)Pb超薄膜と磁性原子との間にAuやAgなどを挿入することにより、ホスト金属の価電子数が実効的に減少し、TKは著しく減少する。特に、AuやAgでコーティングすることによって、 T_c の減少率が大きくなるという、一見意外に思える結果が観測されたが、(1)と(3)により説明できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性原子密度に対する T_c の減少率を、磁性原子の種類を系統的に変えて測定した研究は、バルクの希薄磁性合金でも行われておらず、本研究が初めてである。また、金属表面の磁性原子のTKは、これまで走査トンネル分光法によって得られたスペクトルをファノ関数によって解析する手法によってのみ得られていたが、本研究で用いられた手法は、その検証に使えるだけでなく、走査トンネル分光法による手法が苦手とする高いTKの決定にも用いることができる。さらに、本研究でコーティングによってTKを大きく制御できることが示されたが、ナノスケールのスピントロニクス素子の開発など応用にもつながる重要な成果と確信する。

研究成果の概要（英文）：The suppression rate of the superconducting transition temperature T_c of ultrathin Pb films due to magnetic adatom deposition was systematically studied for various magnetic material and coating material. All the experimental results are explained in terms of the following assumptions. (1) The suppression rate reaches its maximum when the Kondo temperature TK is about the same as T_c . (2) TK decreases rapidly as the spin of adatoms increases. (3) By inserting Au or Ag between the Pb film and the magnetic adatoms, the number of valence electrons of the host metal atoms is effectively reduced, and TK decreases significantly. It was found that coating Pb films with Au or Ag increases the suppression rate. This seemingly surprising result can be explained in terms of (1) and (3).

研究分野：低温物理学

キーワード：ラシュバ効果 超伝導

1. 研究開始当初の背景

本研究開始前の研究において、我々のグループでは、原子レベルで平坦な GaAs 劈開基板上に形成された Pb 単原子層系、および障壁層と Pb 単原子層を交互に堆積した積層構造系に対して、超伝導転移温度の平行磁場依存性の測定を詳細に行い、Rashba 型のスピン軌道相互作用に起因する新奇な超伝導状態を仮定することによって説明できるいくつかの興味深い振る舞いを観測してきた。しかし、Rashba 相互作用が本質的に重要であることを直接示す証拠は得られていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、中央に強磁性体層を配置した障壁を介してトンネル結合させた Pb 単原子層の 2 層構造試料を作製して、Rashba 相互作用により生じるスピン三重項成分の有無を明らかにすることを目的とした。その前段階として、障壁層を介して近接させた磁性体が Pb 単原子層の超伝導に及ぼす影響を、障壁層の厚さや磁性体の密度などの条件を広い範囲で系統的に変えて測定して、磁氣的相互作用の大きさや超伝導の抑制機構を明らかにすることも重要な目的とした。

実際には、Pb 超伝導超薄膜あるいは Pb 超薄膜を常伝導金属でコーティングしたハイブリッド超伝導超薄膜の表面に磁性原子を堆積させた場合において、磁性原子密度に対する超伝導転移温度の減少率から、超伝導転移温度の減少率と磁性原子の近藤温度との普遍的な関係式や近藤温度の磁性原子と表面金属の種類に対する依存性といった学問的な影響がより広く重要な見解が得られることがわかってきたため、後者の研究に軸足を移した。

3. 研究の方法

無添加半絶縁性 GaAs を極低温・超高真空中において劈開することによって得られる原子レベルで平坦な基板上に 2-4 原子層の Pb 超薄膜を作製した。常伝導金属によるコーティングおよび磁性原子の蒸着も冷却基板上で行った。急冷蒸着法と呼ばれるこの手法により、結晶粒形成、Pb と常伝導金属との相互拡散、磁性体のアイランド化といった問題を回避することができる。バルクの希薄磁性合金の場合と対照的に、表面系では不純物密度を同一試料に対してその場制御することができる。

図 1 は代表的な測定結果である。シート抵抗の温度依存性から決定される超伝導転移温度 T_c は、超薄膜表面の磁性原子の密度に対して直線的に減少するが、その減少率は磁性体の種類、常磁性金属のコーティングによって劇的に変化する。本研究では、3d 遷移金属の吸着原子に対して系統的な研究を行った。

磁性原子密度に対する超伝導転移温度の減少率と近藤温度 T_K との関係が、松浦らによって計算されている [Matsuura, Ichinose, Nagaoka, Prog. Theor. Phys. 57, 713 (1977)、以下 MIN 理論] 図 2 は、図 1 に示した Pb 超薄膜上の Fe の実験におけるパラメータを用いた計算結果である。 T_K が不純物がないときの超伝導転移温度 T_{c0} と比べて大きい場合、ホスト金属の状態密度などを用いて規格化された T_c の減少率は T_K の増大とともに減少するが、理論が信頼できるこの領域では計算値との比較から近藤温度を導出することができる。

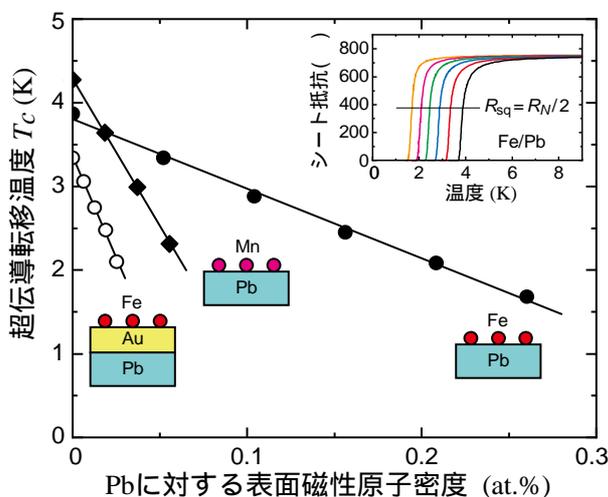


図 1 : 表面磁性原子による T_c の減少

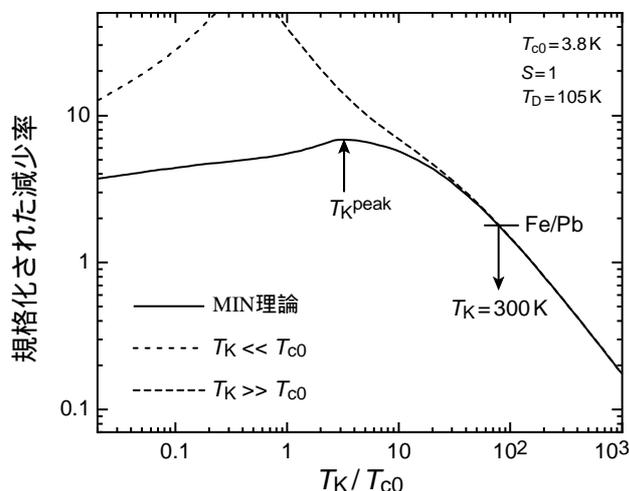


図 2 : MIN 理論による減少率の計算

4. 研究成果

図3に、実験から得られた T_K を表面磁性原子のスピンの大きさ S の関数としてプロットした結果を示す。Pb 超薄膜、1.5 原子層程度の Au または Ag でコーティングを行ったハイブリッド超薄膜の3種類の超薄膜に対する結果である。

実験結果は、以下の(1)(2)(3)を仮定することにより定性的に説明することができた。

(1) 図2に示したMIN理論にもとづいた計算のように、 T_K が T_{c0} よりも小さな領域では T_K の増加関数であるが、 T_K が T_{c0} よりも大きな領域ではおおむね T_K に反比例する。したがって、 T_K が T_{c0} と同程度のところで T_K は最大となる。MIN理論にもとづいた計算では $T_K \sim 3T_{c0} \sim 10\text{ K}$ でピークとなる。 $T_K \sim T_{c0}$ で、MIN理論は定量的に信頼できないが、定性的には正しい結果を与えると仮定する。

(2) 図4に示したように、バルクの希薄磁性合金においては、 T_K は磁性体のスピン S の増加 [Ni ($S=1$) Co ($3/2$) Fe (2) Mn ($5/2$)] に伴い急激に減少する。これは、フント結合によって近藤一重項の形成が抑制された結果として理解されている。表面磁性原子と希薄磁性合金中の磁性原子では、隣接するホスト金属の原子の数が異なるために、 T_K の絶対値は異なるものの、スピン S に対する依存性は似通ったものになると仮定する。

(3) バルクの希薄磁性合金においては、 T_K はホスト金属の価電子数が増えると急激に大きくなる傾向が知られている。図4に示したように、同じ S に対して、価電子数が1のAuやAgより、2のZnや3のAlにおいて T_K が高くなっていることがわかる。同様の傾向が金属表面の磁性原子にも成り立つと仮定すると、価電子数が4であるPb超薄膜と磁性体との間にAuやAgなどを挿入することにより、実効的な価電子数が下がり、 T_K は著しく減少すると考えられる。

図5に図3の実験結果をもとに得られた近藤温度をスピンの大きさ S の関数として示した。シンボルで示した点は、MIN理論が信頼できる $T_K \gg T_{c0}$ の領域に対して得られた結果である。また、点線は図3の結果を定性的に説明するように、(2)(3)の仮定に基づいて描いた。CoとFeで、Feの方が大きいことは、 T_K の減少関数となる領域にあり、Feの T_K の方が小さいことにより説明できる。Coなどでは、Pb超薄膜表面をAuやAgでコーティ

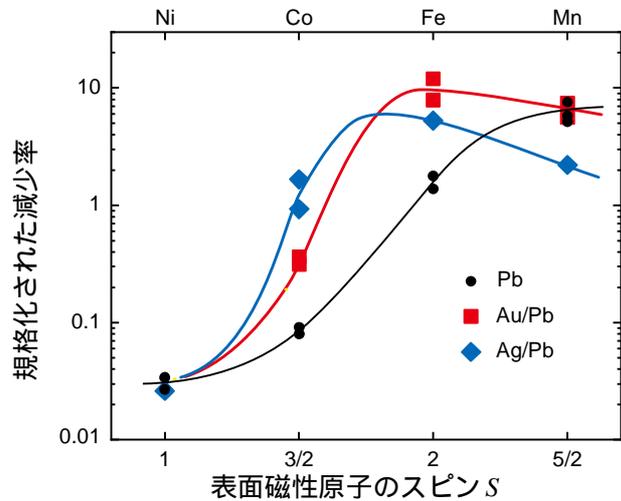


図3 : T_c の減少率 vs スピンの大きさ

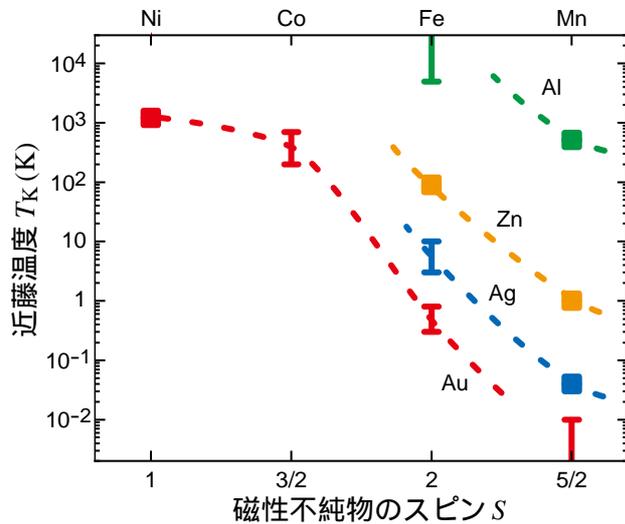


図4 : バルクの希薄磁性合金の近藤温度

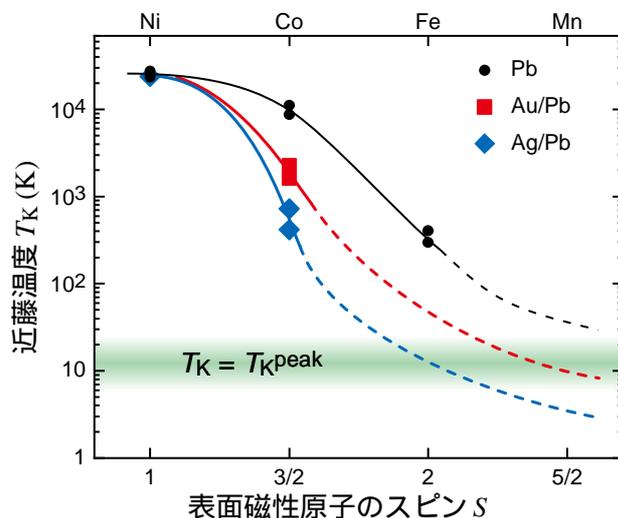


図5 : 図3の結果をもとに得られた近藤温度

ングすることによって、すなわち対破壊効果が大きくなるという、一見意外に思える結果が観測されたが、コーティングによって T_k が減少した結果として説明することに成功した。Fe と Mn を比較した場合、Co と Fe の場合とは異なり、Au と Ag をコーティングしたハイブリッド超薄膜では S の増大に伴う T_k の増大は見られなかったが、 T_k がピークに達したためだと理解できる。

磁性原子密度に対する超伝導転移温度の減少率を、磁性原子の種類を系統的に変えて測定した研究は、バルクの希薄磁性合金でも行われておらず、本研究が初めてである。また、金属表面の磁性原子の近藤温度は、これまで走査トンネル分光法によって得られたスペクトルをファノ関数によって解析する手法によってのみ得られていたが、本研究で用いられた手法は、その検証に使えるだけでなく、走査トンネル分光法による手法が苦手とする高い近藤温度の決定にも用いることができる。さらに、本研究でコーティングによって T_k を大きく制御できることが示されたが、ナノスケールのスピントロニクス素子の開発など応用にもつながる重要な成果と確信する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ito Naoto, Masutomi Ryuichi, Okamoto Tohru	4. 巻 105
2. 論文標題 Cancellation of electron and hole contributions to the Hall effect in ultrathin Bi films grown on GaAs(110)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.205434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Masutomi, T. Okamoto, Y. Yanase	4. 巻 101
2. 論文標題 Unconventional superconducting phases in multilayer films with layer-dependent Rashba spin-orbit interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.184502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 R. Masutomi, T. Okamoto, Y. Yanase
2. 発表標題 Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene and two-dimensional Materials Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本徹
2. 発表標題 金属単原子層における二次元超伝導と磁性
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤尚人、岡本徹
2. 発表標題 GaAs劈開面上のBi薄膜の磁場中輸送特性
3. 学会等名 第11回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Masutomi, T. Okamoto
2. 発表標題 Observation of crossover from a complex stripe phase to a helical phase in multilayer films
3. 学会等名 Tsinghua Univ and The Univ of Tokyo The 7th Joint Workshop on Trans-scale Materials Science (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------